

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/322626665>

Континуальная модель и метод расчета прессования и спекания порошковых материалов

Conference Paper · November 2017

DOI: 10.13140/RG.2.2.31056.40962

CITATIONS

0

2 authors:



I. S. Nikitin

Institute for Computer Aided Design of Russia...

85 PUBLICATIONS 48 CITATIONS

SEE PROFILE



N. G. Burago

Russian Academy of Sciences

117 PUBLICATIONS 128 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



I just participate in several projects of Russian Academy of Sciences devoted to development of numerical methods for Continuum Mechanics [View project](#)

**ЦИФРОВЫЕ
СРЕДСТВА
ПРОИЗВОДСТВА
ИНЖЕНЕРНОГО
АНАЛИЗА**

**Сборник материалов
Первой всероссийской
конференции
с международным участием**

Редакционная коллегия:

доктор физико-математических наук,
профессор *В. А. Левин* (научный редактор);
доктор физико-математических наук, профессор *В. А. Панин*;
доктор физико-математических наук, профессор *К. М. Зингерман*;
доктор технических наук, профессор *А. Н. Привалов*
(ответственный редактор);
доктор технических наук, профессор *А. Е. Гвоздев*;
доктор технических наук, доцент *А. Н. Чуканов*;
кандидат технических наук *А. А. Зубов*;
кандидат физико-математических наук *Н. Н. Добровольский*;
специалист по НИР НИС *Ю. Г. Рыжов*

Ц75

Цифровые средства производства инженерного анализа: Сб. материалов Первой всерос. конф. с междунар. участием [Электронный ресурс]. – Электрон. дан.– Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, 2016.– 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).– Систем. требования: Intel Celeron 1700 Mhz и выше, 128 Мб RAM, 300 Мб на винчестере, ОС Microsoft Windows XP, Vista; дисковод CD-ROM 2x и выше, SVGA 64 Mb; мышь. – Загл. с этикетки диска. – ISBN 978-5-6040223-6-8

В сборнике представлены материалы Первой всероссийской конференции с международным участием «Цифровые средства производства инженерного анализа», прошедшей 27 ноября – 1 декабря 2017 г. на базе Тульского государственного педагогического университета им. Л. Н. Толстого. Материалы сборника включают в себя сведения о современном состоянии разработок по направлениям: вычислительная механика, использование инженерного программного обеспечения для решения промышленных задач, направления и результаты разработки инженерного программного обеспечения для инженерного анализа. В секционных докладах рассмотрены вопросы разработки «коробочного» ИПО, разработки облачных сервисов на основе ИПО и разработки отраслевых специализированных решений на основе ИПО для машиностроения, нефтегазовой и горнодобывающей промышленности, строительства, в том числе представлены новейшие научные результаты разработки фундаментальных проблем в области задач механики деформируемого твердого тела, задач механики жидкости и газа, новых материалов, аддитивных технологий, метаматериалов и численных методов.

ББК 32.98

Н. Г. Бураго¹, И. С. Никитин²

¹*Институт проблем механики РАН им. А. Ю. Ишлинского (Москва, Россия);*

²*Институт автоматизации проектирования РАН (Москва, Россия)*

КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РАСЧЕТА ПРЕССОВАНИЯ И СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Предложена модель прессования и спекания порошковых композитов как вариант теории упругопластического течения пористой среды. Представлены примеры конечно-элементного расчета неоднородных процессов прессования и спекания.

Ключевые слова: спекание, холодное прессование, контактное взаимодействие, пористость, поврежденность, упругость, пластичность

CONTINUAL MODEL AND CALCULATION METHOD OF PRESSING AND SINTERING OF POWDER MATERIALS

Abstract. A model is proposed for pressing and sintering of powdered composites as a variant of the elastoplastic flow theory of a porous medium. Examples of finite element calculation are provided for non-uniform processes of pressing and sintering.

Keywords: sintering, cold pressing, contact interaction, porosity, damage, elasticity, plasticity

1. Введение

Интенсивные теоретические исследования процессов спекания развернулись, начиная с 20-го века, в связи с широким внедрением новых порошковых композитов в технике. Для предсказания результатов спекания реальных изделий в условиях сложной геометрии и неоднородных состояний требуется численное моделирование на основе описания процессов в рамках механики сплошной среды. Для формулировки начально-краевых задач континуальной механики прежде всего необходимы определяющие соотношения, описывающие термомеханическое состояние материала прессовки при прессовании и спекании.

Процесс спекания наблюдается в двухкомпонентных порошковых композитных материалах пористых заготовок будущего изделия (прессовок), полученных уплотнением порошка давлением в пресс-формах. Исходно материал прессовок представляет собой смесь легкоплавких частиц, образующих матрицу композита, и тугоплавких, более прочных частиц твердой фазы. Объем пор между частицами заполнен воздухом. Если температура достаточна для плавления материала матрицы и имеет место смачивание частиц твердой фазы материалом матрицы, то поровые капиллярные силы поверхностного натяжения суммарно действуют как всестороннее сжимающее напряжение большой интенсивности, сравнимое по порядку величины с модулями упругости материалов композита. Эта, не обусловленная деформацией, нагрузка называется напряжением спекания и обеспечивает закрытие пор в процессе спекания.

Прессование, то есть приложение давления, обусловленного контактом со стенками пресс-формы, также приводит к уплотнению материала, но такое уплотнение выражено гораздо слабее, поскольку внешнее контактное давление значительно уступает по интенсивности напряжению спекания.

Таким образом, композит подвергается последовательно прессованию и спеканию. Спекание реализуется при условии интенсивного нагрева, достаточного для плавления легкоплавкого материала матрицы, заполняющего пространство между частицами тугоплавкой фазы. Процесс жидкостного спекания прекращается или при исчезновении пор, или из-за отверждения материала матрицы.

Анализ большого числа российских и зарубежных публикаций показывает, что имеется три основных варианта континуального моделирования макро-неоднородных процессов спекания.

В первом варианте остаточная пористость в прессовках рассчитывается по полю температуры, деформации учитываются только за счет уменьшения пористости и за счет эффекта температурного всестороннего растяжения-сжатия [1]. Во втором варианте дополнительно рассчитываются необратимые деформации прессовок по уравнениям вязкого течения без учета упругости [2]. В третьем варианте спекание прессовки рассматривается как течение вязкоупругой [3] или упругопластической пористой среды, что позволяет моделировать единым алгоритмом не только прессование и спекание, но и разрушение [4].

Прессовка изначально является твердым деформируемым телом, то есть обладает структурой и способностью держать форму, хотя при этом имеет крайне слабые начальные упругие свойства. Именно малость упругих деформаций провоцирует авторов теорий вязкого течения на упрощенную формулировку, пренебрегающую упругими деформациями. Однако пренебрежение упругой деформацией аннулирует важнейшее свойство твердых деформируемых тел – память о разгруженном состоянии. Пренебрежение упругой деформацией подменяет консервативные упругие напряжения, свойственные структурированным средам, диссипативными вязкими напряжениями, которыми невозможно обеспечить состояние статического равновесия структурированной среды. Величина вязких напряжений не может служить критерием нарушения структуры среды, означающего разрыв упругих связей. Вязкие напряжения не могут служить остаточными напряжениями, поскольку в состоянии покоя вязких напряжений нет. Так что, если выбрасывать упругие напряжения, то получать правильный ответ на ряд важнейших практических вопросов становится невозможно. Поэтому формулировки, учитывающие упругость прессовок, представляются предпочтительными.

В настоящей работе к расчету прессования и спекания применена модификация теории упругопластического течения [5]. В систему уравнений обычной теории добавлено кинетическое уравнение для расчета эволюции пористости при нетермомеханическом воздействии всесторонним сжимающим напряжением спекания, а свойства упругости зависят от величины пористости. Отличие от моделей вязкого течения состоит в том, что напряжения в прессовке обуслов-

лены именно упругой частью деформации, ограничены условием пластичности и никак не связаны со скоростью деформации.

Модификация обычной теории упругопластического течения без больших усилий может быть внедрена в программы расчета упругопластических сред для адаптации к процессам спекания [6].

На модельных примерах численно продемонстрирована способность модифицированной теории упругопластического течения воспроизводить основные эффекты процессов прессования и спекания, включая определение остаточных пористости, напряжений и деформаций в прессовке, а также ее остаточной формы и физико-механических свойств.

2. Вариант теории течения для расчета процессов спекания

Набор термодинамических параметров состояния упругопластической пористой разрушающейся среды обычно содержит температуру T , деформацию $\boldsymbol{\varepsilon}$, скорость деформации \mathbf{e} , пластическую деформацию $\boldsymbol{\varepsilon}_p$, поврежденность θ и пористость ω . В этом случае свободную энергию φ и скорость диссипации энергии D в единице массы можно записать следующим образом

$$\varphi = \frac{K}{2\rho_p} \left(\ln \frac{\rho}{\rho_p} + \beta(T - T_0) \right)^2 + h_1 \frac{\mu}{\rho} (\boldsymbol{\varepsilon}' - \boldsymbol{\varepsilon}'_p)^2 : \mathbf{I} + H(T - T_\omega) \varphi_\omega(T - T_\omega, \omega) \quad (1)$$

$$D = H(\Phi_p) k_y f_p + \frac{k_T}{T} \nabla T \cdot \nabla T + H(\Phi_\theta) k_\theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + H(\Phi_\omega) k_\omega \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 \quad (2)$$

здесь K и μ модули упругости всестороннего растяжения-сжатия и сдвига, соответственно; ρ и ρ_p - плотности текущего и разгруженного состояний, соответственно; β - коэффициент температурного растяжения-сжатия, \mathbf{I} - тензорная единица, двоеточие обозначает двойное скалярное произведение, $h_1 = (1 - 2/3(\boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{I}))^{-1}$; T_ω - температура плавления легкоплавкой составляющей, $H()$ обозначает функцию Хевисайда, равную единице для неотрицательных значений аргумента и нулю в противном случае. Функции параметров состояния выражают: $\Phi_p = 0$ - условие пластичности, $\Phi_\theta \geq 0$ - условие разрушения, $\Phi_\omega \geq 0$ - условие жидкостного спекания. Функциями параметров состояния также являются: функция k_y - радиус поверхности текучести, f_p - функция дивергента скорости пластической деформации, определяющая кинетику пластических деформаций изменения формы (упруго-пластичность, упруго-вязкопластичность), k_T - коэффициент теплопроводности, функции k_θ и k_ω - определяют кинетику поврежденности и пористости, соответственно. В формулах (1)-(2) использованы пространственные тензоры нвпряженно-деформированного состояния, ∇ - оператор пространственного дифференцирования. Кинетика пористости напрямую связана с кинетикой объемной пластической деформации [2]

$$\mathbf{e}_p : \mathbf{I} = \frac{1}{1-\omega} \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

Выражения для свободной энергии и скорости диссипации максимально упрощены. Первое и второе слагаемые в выражении свободной энергии выражают упругую энергию объемных и сдвиговых упругих деформаций, причем только объемные деформации считаются большими, а девиатор упругих деформаций считается малым. Выражение энергии объемных деформаций является обычным, оно учитывает температурные деформации всестороннего расширения-сжатия (с коэффициентом β). Множитель h_1 во втором слагаемом приводит к упрощенной связи девиаторов напряжений и упругих деформаций, характерной для малых деформаций. Третье слагаемое выражает свободную энергию активных пор, которая зависит от пористости и температуры, причем включается только при достижении температуры плавления T_ω материала матрицы (условие активности пор). Этот член определяет выражение для напряжения спекания.

Из выражений (1)-(2) и законов термодинамики выводятся следующие определяющие соотношения [5]:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}', & \boldsymbol{\sigma}' &= 2\mu(\boldsymbol{\varepsilon}' - \boldsymbol{\varepsilon}_p'), & p &= K \frac{\rho}{\rho_p} \left(\ln \frac{\rho}{\rho_p} + \beta(T - T_0) \right) \\ d\boldsymbol{\varepsilon}'_p / dt &= H(\boldsymbol{\sigma}' : \boldsymbol{\sigma}' - k_p^2) \lambda_p \boldsymbol{\sigma}', & d\rho_p / dt &= -\frac{\rho_p}{1-\omega} \frac{d\omega}{dt} \\ d\theta / dt &= -H(\Phi_\theta) k_\theta^{-1} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}, & d\omega / dt &= -H(\omega) k_\omega^{-1} (p + \sigma_\omega) \\ \sigma_\omega &= \rho \frac{\partial \varphi_\omega}{\partial \omega} (1-\omega), & \mathbf{q} &= k_T \nabla T \end{aligned}$$

Дополняя эти соотношения законами сохранения массы, импульса и энергии

$$\begin{aligned} d\rho / dt &= -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \\ \rho d\mathbf{v} / dt &= \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \rho c_V dT / dt &= \boldsymbol{\sigma} : \nabla \otimes \mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{q} + r \end{aligned}$$

а также кинематическими соотношениями

$$\begin{aligned} d\mathbf{x} / dt &= \mathbf{v}, & \mathbf{u} &= \mathbf{x} - \mathbf{x}^0 \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= (\nabla \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u} \otimes \nabla - (\nabla \otimes \mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \otimes \nabla)) / 2, & \boldsymbol{\varepsilon}' &= \boldsymbol{\varepsilon} - (\boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{I}) \mathbf{I} / 3 \end{aligned}$$

получаем полную систему 15 уравнений относительно 15 искомым функций:

$$(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}'_p, \omega, \rho, \rho_p, T, \mathbf{q}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}', p, \theta),$$

из которых можно выделить основные, подчиненные эволюционным уравнениям

$$Y = (\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\varepsilon}'_p, \omega, \rho, \rho_p, \theta, T)$$

Начальные условия имеют вид:

$$t = 0, \mathbf{x} \in V : Y = Y^0(\mathbf{x})$$

где V – пространственная область решения с границей области S .

Граничные условия имеют вид

$$t \geq 0, \mathbf{x} \in S_v \subseteq S : \mathbf{v} = \mathbf{v}_*(\mathbf{x}, t), \quad t \geq 0, \mathbf{x} \in S \setminus S_v : \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{f}_*(\mathbf{x}, t)$$

$$t \geq 0, \mathbf{x} \in S_T \subseteq S : T = T_*(\mathbf{x}, t), \quad t \geq 0, \mathbf{x} \in S \setminus S_T : \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = Q_*(\mathbf{x}, t)$$

где \mathbf{n} - единичная внешняя нормаль к границе, а правые части граничных условий являются заданными функциями.

3. Расчеты прессования и спекания в неоднородном состоянии

Рассмотрим пример расчета осесимметричных процессов прессования и спекания для случая неоднородного термомеханического состояния безматричным вариантом метода конечных элементов [6]. Расчетная схема и начальная сетка показана на рис. 1-а.

Пусть в начальный момент времени $t=0$ в печь цилиндрической формы насыпан композитный порошок и плоским штампом доведен до пористости $\omega_0 = 0.5$. Затем рассчитывается холодное прессование с помощью сферического штампа-крышки. Штамп движется вниз, деформируя прессовку до неоднородного состояния, показанного на Рис. 1-б для момента времени $t = 38$. Распределение пористости и пластической работы после холодного прессования показано на рис. 1-в.

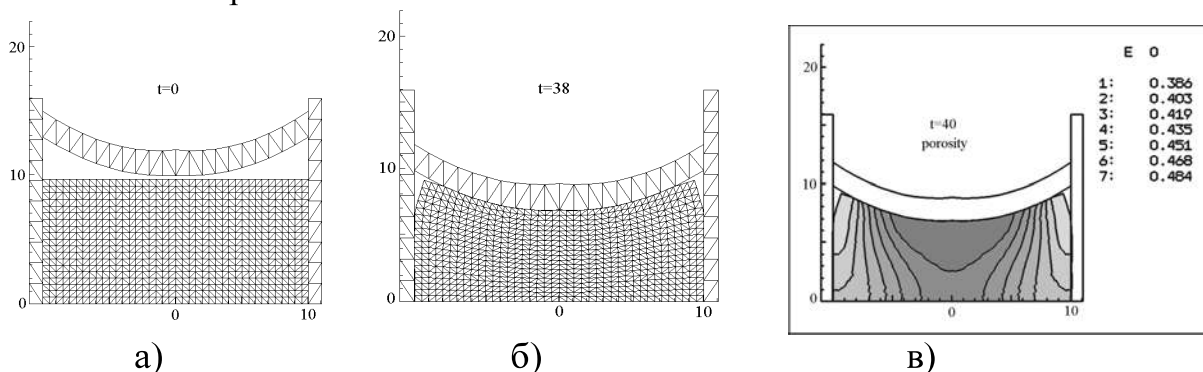


Рис. 1. Стадия холодного прессования порошка в цилиндрической пресс-форме подвижным сферическим штампом (а, б) и распределение пористости (в) в конце стадии холодного прессования

Далее штамп убирается вверх, а прессовка ("green body") остается ненагруженной до момента времени $t = 40$. Потом печь быстро нагревается до температуры $T = T_0$. Эта температура сохраняется постоянной до момента времени $t = 140$. В это время действует напряжение спекания, зависимость которого от пористости принималась в виде:

$$\sigma_\omega = s^*(T)\omega = H(t-t_2)H(t_3-t)\omega$$

Материал прессовки вначале не имеет способности сопротивления деформации, его модули упругости и предел текучести зависят от пористости следующим образом

$$K = 975(1 - \omega / \omega_0), \quad \mu = 369(1 - \omega / \omega_0), \quad k_y = 1 - \omega / \omega_0$$

где $\omega_0 = 0.5$ - начальная пористость. По мере уменьшения пористости свойства упругости нарастают.

Окончательная форма испеченного тела, распределение пористости и интенсивность остаточных напряжений показаны на рис. 2.

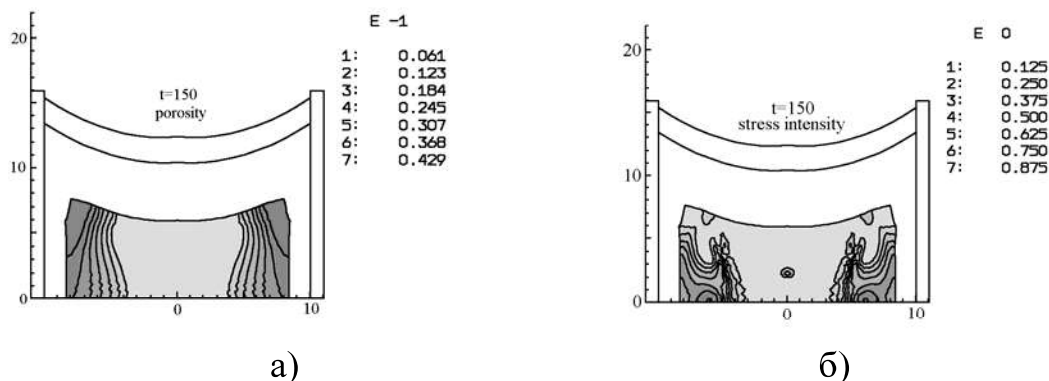


Рис. 2. Форма тела, распределение пористости (а) и интенсивности остаточных напряжений (б) после спекания

4. Выводы

Предложена модель прессования и спекания порошковых композитов как вариант теории упругопластического течения пористой среды. Представлены примеры конечно-элементного расчета неоднородных процессов прессования и спекания.

Литература

1. Гостеев Ю.А., Федоров А.В. Математическое моделирование спекания ультрадисперсного порошка // Физика горения и взрыва, 2004. –Т. 40. – № 2. – С. 42-44.
2. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. – Киев: Наук. думка, 1972. 149 с.
3. Жорник В.А., Прокопенко Ю.А. Моделирование процессов спекания порошковых покрытий при тепловом и механическом воздействиях// Вестник ТГТУ, 2010. – Том 16. – № 1. – С. 59-66.
4. Hernandes J., Oliver J., Cante J.C., Weyler R. Numerical modeling of crack formation in powder forming processes // Int. J. Solids and Structures, 2011. – V. 48. – P. 292-316.
5. Бурого Н.Г., Глушко А.И., Ковшов А.Н. Термодинамический метод получения определяющих уравнений для моделей сплошных сред // Изв. РАН. МТТ, 2000. – № 6. – С. 4-15.
6. Бурого Н.Г., Никитин И.С., Якушев В.Л. Гибридный численный метод решения нестационарных задач механики сплошной среды с применением адаптивных наложенных сеток // ЖВММФ, 2016. – Т. 56. – № 6. – С. 1082-1092.